

SIMULAÇÃO DA PENETRAÇÃO SAR-X EM UM PACOTE DE NEVE SECA

Jean Marcel de Almeida Espinoza¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), campus Rio Grande, email: espinoza.almeida@gmail.com.

RESUMO

Devido à relevância do uso dos sinais de retroespalhamento de radar de abertura sintética sobre a criosfera, é fundamental se examinar a dependência do sinal de radar com a profundidade de penetração ao longo de um pacote de neve seca, caso se deseje estudar esse alvo. Para tanto, foi estabelecida a modelagem do retroespalhamento SAR na banda X em polarização VV para um alvo homogêneo de neve seca com as características encontradas em uma área piloto na geleira Union, Antártica, onde foram realizadas 7 trincheiras de neve para obtenção das características do pacote de neve. Para cada um desses conjuntos de parâmetros, utilizamos um modelo dielétrico para neve derivado da teoria eletromagnética de flutuação forte. As profundidades de penetração, para um pacote homogêneo de neve seca foi cerca de 11,4 m a 13,6 m (para banda X). A análise permitiu verificar que o fator determinante é o tamanho do cristal de neve; Todos os parâmetros têm efeito em frequências intermediárias.

Palavras-chave — Sigma-zero, Estratigrafia, Modelagem da Neve seca.

ABSTRACT

Because of the relevance of the use of synthetic aperture radar backscatter signals over the cryosphere, it is critical to examine the dependence of the radar signal on the depth of penetration along a dry snowpack if one wishes to study that target. To this end, it was established the SAR backscattering model in the X band in VV polarization for a homogeneous target of dry snow with the characteristics found in a pilot area in the Union glacier, Antarctica, where 7 snow trenches were realized to obtain the characteristics of the package of snow. For each of these sets of parameters, we used a dielectric model for snow derived from the electromagnetic theory of strong fluctuation. The penetration depths for a homogeneous dry snow package were about 11.4 m to 13.6 m (for X-band). The analysis showed that the determining factor is the size of the snow crystal; All parameters have an effect on intermediate frequencies.

Key words — Sigma-nought, Stratigraphy, Dry Snow Modeling.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das décadas de 1990 e 2000, resultados de extensos estudos sobre a resposta de retroespalhamento de radar da cobertura de neve seca foram publicados. O primeiro artigo introduziu um modelo de transferência radiativa para uma camada de neve acima da superfície do solo. O modelo foi então resolvido numericamente (de modo a incluir contribuições de espalhamento múltiplo) para ilustrar o comportamento geral dos coeficientes de retroespalhamento polarizados, como função de alguns dos parâmetros pertinentes para a neve, como a profundidade e o tamanho dos grãos de neve. Os cálculos baseados no modelo foram comparados com medidas descritas na literatura.

Desde meados da década de 1980, esforços têm sido feitos no sentido de construir modelos de interação entre o feixe de micro-ondas e as massas de neve, devido ao reconhecido uso do imageamento por micro-ondas no estudo da neve.

Com base na modelagem proposta e na literatura, algumas considerações sobre o retroespalhamento do pacote de neve seca ao longo da banda X puderam ser feitas:

- A diferença entre o retroespalhamento da neve seca e a neve úmida em função da variação do ângulo de incidência é relevante, principalmente quando a camada de neve superficial é pouco espessa [1] [2].

- O coeficiente de retroespalhamento da neve úmida não depende do equivalente-água desta neve, mas é altamente dependente da umidade da camada de neve e da rugosidade desta cobertura. Isto ocorre porque a maior contribuição ao retroespalhamento é gerada pela interface ar-neve, havendo pouca penetração no volume [1], [3] [4] [5].

- O aumento da densidade média do pacote de neve superficial, relacionado a redução do tamanho dos grãos, faz com que tenhamos uma variação do coeficiente de retroespalhamento SAR-X em direção a valores positivos, com uma redução do módulo do retroespalhamento;

- No caso da neve seca, os fatores de maior importância na determinação do retroespalhamento SAR-X banda X são a densidade média do pacote de neve superficial, o tamanho médio dos grãos de neve que compõe o pacote de neve, responsável por espalhar o feixe SAR-X, e a espessura média das camadas de neve (i.e., importante pelo fato de que na interface entre duas camadas há uma potencialização dos processos de refração e espalhamento).

Esta permissividade dielétrica pode ser considerada constante no caso de um pacote homogêneo de neve seca, já

que o principal fator de variação dielétrica é o teor de umidade da neve [6].

Outro fator de dependência do retroespalhamento medido por um sensor SAR-X é o ângulo de incidência do feixe de micro-ondas. O aumento do ângulo de incidência, em linhas gerais, acaba por acarretar uma diminuição do retroespalhamento absoluto [1].

Nessas abordagens, para a modelagem dos processos de retroespalhamento e da interação das micro-ondas com a neve seca, um recente avanço são os métodos de integração do retroespalhamento que ocorre ao longo de todo o volume do pacote de neve. Esse trabalho propõe uma modelagem analítica para a interação entre um feixe de micro-ondas na banda X e pacote de neve (em áreas de neve seca).

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma modelagem do retroespalhamento SAR-X, resultando em uma equação de penetração do feixe SAR-X para um pacote de neve seca de forma simplificada.

Para implementação do modelo, foi selecionada uma área da geleira Union/Antártica (Fig. 01), onde foram abertas 7 trincheiras de neve a fim de determinar as características estratigráficas dos pacotes de neve.

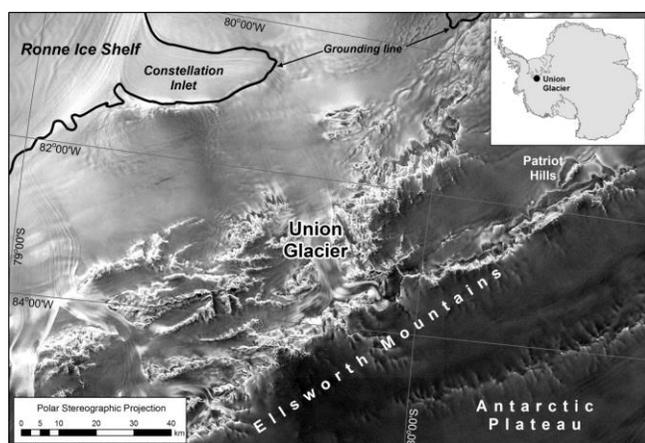


Figura 1. Área de estudo da região de Union Glacier.

As características (e.g., tamanho do grão de neve, densidade, entre outros) foram utilizadas para a estimativa da penetração do feixe SAR-X. Foi selecionado uma área de neve seca e com disponibilidade de dados de campo sobre a estratigrafia do pacote de neve e dados SAR-X do satélite COSMO-SkyMed.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Dessa forma, utilizou-se o Método numérico de Elementos Finitos (MEF) para a solução de equações diferenciais que compõem a interação SAR-X e a neve seca, baseando-se no pressuposto do RTM, considerando como principais variáveis nesse processo a profundidade da neve acumulada, a rugosidade da superfície (interface ar-neve), o tamanho dos cristais de neve (tamanho de grão), o perfil de densidade

da neve e o número de camadas de neve, que formam o pacote de neve simulado (espessura, forma da interface entre a variação de camadas entre camadas dielétricas, entre outras).

A obtenção de dados estratigráficos em campo, para descrever as características da cobertura de neve analisada, foi feita a partir de uma série de escavações controladas, conhecidas como trincheiras de neve (ou snowpits). Cada uma das trincheiras de neve foi realizada seguindo uma série de procedimentos padrão, presentes junto ao *Snow Pit Protocol & Guide to Snow Grain Types*, documento orientador produzido e distribuído pela Universidade do Colorado/USA.

Os dados coletados junto às trincheiras de neve produziram perfis de descrição da estratigrafia e da temperatura do pacote de neve. Para fins de modelagem, os dados de cada trincheira de neve foram espacializados, seguindo suas coordenadas geográficas de campo, bem como integrados a fim de se obter o valor médio para cada variável ao longo da área escavada.

2.1. Modelagem física do retroespalhamento para dados SAR-X (VV).

Como forma de modelar a penetração de um feixe de micro-ondas proveniente de um sensor SAR-X, realizou-se a integração dos percentuais de espalhamento do sinal SAR via interface da ferramenta *PDETOOL*®. Com isso, considerou-se o limiar de penetração, como a profundidade, à qual somou-se 95% da contribuição do sinal de retroespalhamento medido, conceito de limite de penetração proposto por [1].

A modelagem do retroespalhamento SAR para um pacote de neve seca proposto neste trabalho foi construída com base nos equacionamentos propostos por [1], [3] [4] e [7], devidamente adaptados e simplificados para o problema de interesse: Um pacote de neve seca com dimensões de 2x2x30m (correspondendo às dimensões da unidade pictórica do sensor SAR-X COSMO-SkyMed), composto por grãos de neve com dimensões iguais e de forma esférica e com constante dielétrica idêntica para todos os grãos de neve.

Como premissa inicial, considerou-se o retroespalhamento SAR obtido para um pacote de neve, como sendo dado pela soma dos distintos processos de retroespalhamento do feixe de micro-ondas, que ocorrem ao longo do alvo de interesse. Esses processos de espalhamento do feixe de micro-ondas foram determinados seguindo o proposto por Rees (2006), mostrando que o espalhamento de superfície junto a interface neve-ar, o espalhamento volumétrico ocorrido ao longo do pacote de neve e o espalhamento de fundo, ocorrido junto a interface gelo-neve (caso o pacote de neve seja raso e não ocorra a atenuação total do feixe ao longo do perfil de neve) (Fig. 02).

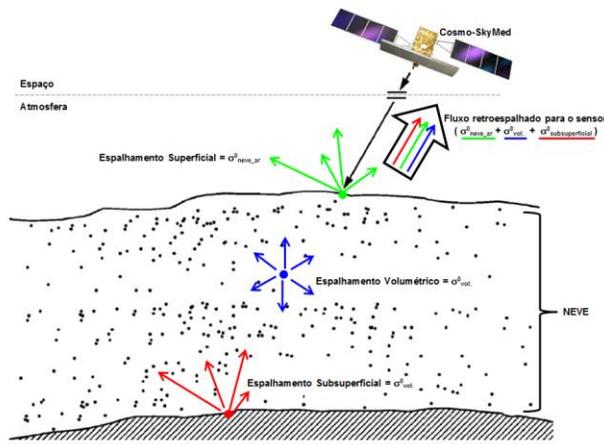


Figura 2. representação dos processos de retroespalhamento ao longo de um pacote de neve

Com estas considerações, o retroespalhamento de um pacote de neve, para uma dada unidade imageada no terreno, é representado pela Figura 2. Matematicamente, este conjunto de processos é descrito por (Equação 1):

$$\sigma_{OT} = \sigma_{0\ sup} + \sigma_{0\ vol} + \sigma_{0\ fun} \text{ (Eq. 1)}$$

Onde, σ_{OT} denota o retroespalhamento total da área medida, $\sigma_{0\ sup}$ indica o retroespalhamento ocorrido na superfície da interface neve-ar, $\sigma_{0\ vol}$ o retroespalhamento ocorrido ao longo do volume do pacote de neve e $\sigma_{0\ fun}$ indica o retroespalhamento de fundo que pode ocorrer na interface neve gelo ou neve solo, se houver. A soma das parcelas superficial, volumétrica e de fundo produzem o retroespalhamento total integrado para área analisada.

A implementação do modelo de retroespalhamento SAR-X proposta neste trabalho baseou-se na solução do modelo de retroespalhamento SAR-X para um pacote de neve seca com dimensões de 3x3x30m, representando horizontalmente um pixel de uma cena SAR-X COSMO-SkyMed. Esta solução foi implementada via MEF (Método dos Elementos Finitos),

A implementação da modelagem do retroespalhamento descrito pelo Fluxograma de Modelagem MEF (Fig. 03), seguiu os seguintes pontos principais: (1) Organização do modelo de retroespalhamento SAR-X a partir do que propõe a literatura e (2) Solução do modelo de retroespalhamento SAR-X via MEF com uso da ferramenta PDETOOL® do software MATLAB® segundo o que propõe [8].

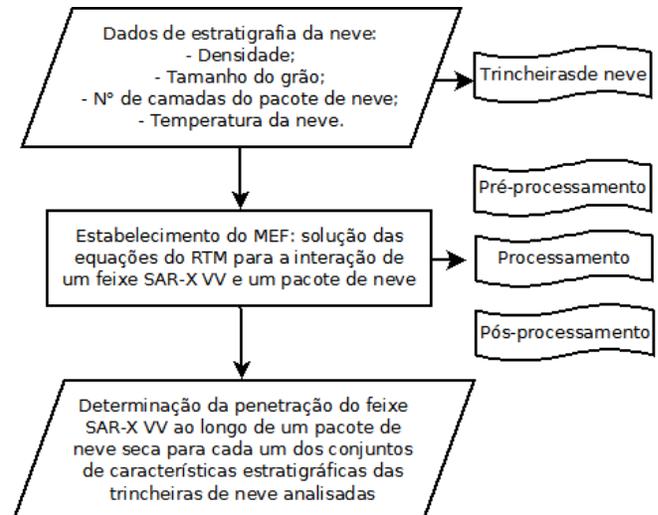


Figura 3. Passos seguidos na Modelagem

3. RESULTADOS

Para possibilitar a estimativa da penetração do feixe SAR-X ao longo de um pacote de neve seca, a partir das variáveis estratigráficas desse pacote de neve, foi estabelecida a equação de penetração (Eq. 02) via MEF.

$$\text{Penetração} = P_0 \cdot e^{\left(-\frac{k}{\epsilon_{neve} \cdot r_{grão}}\right)} + C_0 \text{ (Eq. 2)}$$

Onde, P_0 é potência inicial incidente do feixe SAR-X, e é o número de Euler, k é a constante de atenuação média para a neve seca, estimada via modelagem por [9], ϵ é a permissividade dielétrica do pacote de neve (dada pela equação 02), $r_{grão}$ é o raio médio do grão de neve para o pacote simulado e C_0 é uma constante de contorno utilizada para ajustar os resultados à observação. Essa equação busca estimar a profundidade de penetração do feixe SAR-X, sendo validada pela comparação entre imagens SAR-X e ópticas de áreas com fendas de neve, onde dado de campo permitem avaliar a penetração do feixe SAR-X.

As medidas de penetração para o feixe de radar foram obtidas para distintos números de camadas de neve, distribuição de tamanho dos cristais de neve e densidade de neve, correspondendo aos dados das trincheiras de neve desse trabalho.

No caso de um pacote de neve superficial formado exclusivamente por neve seca, haverá boa penetração do feixe de micro-ondas ao longo da banda X, sendo relevante considerar o espalhamento volumétrico do feixe de micro-ondas ocorrido internamente ao pacote de neve. No caso específico da banda X, a modelagem desenvolvida neste trabalho estimou uma penetração entre 13,60 m e 11,40 m (com limiar máximo de penetração 13.60 m), considerando as variáveis estratigráficas da neve obtidas via escavação em campo.

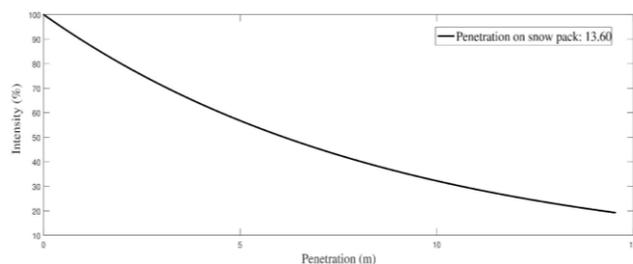


Figura 4. Simulação da penetração SAR-X na neve.

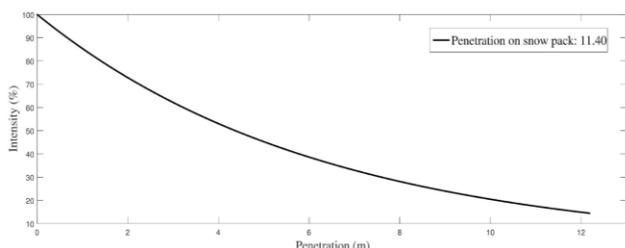


Figura 5. Simulação da penetração SAR-X na neve.

Os resultados apontam uma penetração do feixe SAR-X atingindo valores além de 10 m de profundidade (Figuras 4 e 5). Esse resultado corrobora com a comparação entre imagens ópticas e SAR-X de áreas contendo pontes de neve, onde os dados SAR-X são capazes de mostrar fendas no gelo que estejam cobertas por neve, trazendo uma relevante informação sobre a dinâmica do deslocamento e do derretimento de geleiras.

4. DISCUSSÃO

A penetração do feixe SAR-X em um pacote de neve seca é limitada pela potência radiante do feixe de micro-ondas. Essa potência decai exponencialmente ao longo do perfil penetrado, sendo que a maior parte do sinal retornado ao sensor é dado pela interação entre o feixe incidente e a superfície e ao longo da parcela inicial do pacote de neve [7].

A forma como uma massa de neve seca interage com um feixe de micro-ondas na banda X (SAR-X) está intimamente relacionada aos parâmetros estratigráficos da neve, como o tamanho médio dos grãos da neve, a densidade média do pacote de neve superficial, a temperatura média, além da permissividade dielétrica da neve ao longo das camadas do pacote de neve [7].

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho propôs a implementação de um modelo físico para o retroespalhamento SAR-X com a utilização do MEF e da ferramenta de simulação computacional PDETOOL® do MATLAB®, ajustado às especificidades dos dados SAR-X com polarização VV a fim de estimar a capacidade de penetração de um feixe SAR- em um pacote de neve seca.

O modelo implementado relaciona características estratigráficas da neve (i.e., tamanho médio dos grãos de neve, densidade média do pacote de neve superficial, número de camadas de neve que compõe o pacote de neve superficial, propriedades dielétricas da neve, entre outras) com os valores de penetração do feixe SAR-X em questão. Este processo permitiu a obtenção de uma estimativa do valor de penetração com base nos parâmetros estratigráficos do pacote de neve superficial.

Cabe reforçar que o número reduzido de amostras de campo, limitadas à sete trincheiras de neve, traz limitações quanto a confiabilidade e a robustez dos resultados apresentados. Considerando as dificuldades e os custos de aquisição de dados de campo sobre a estratigrafia da neve, a metodologia proposta é uma ferramenta valiosa. Assim, o uso das equações propostas para determinação da penetração de um feixe SAR-X em um pacote de neve seca permite um melhor entendimento da dinâmica de penetração do feixe SAR-X nesse alvo, bem como uma melhor interpretação das imagens nessa faixa espectral pra alvos de neve seca. Essas estimativas contribuem para avaliar o balanço de massa e equilíbrio termodinâmico de áreas de neve e gelo, por exemplo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ULABY, F.; MOORE, R.; FUNG, A. Microwave remote sensing, active and passive. Norwood, MA: Editora Artech House, v.3, 685 p., 1986.
- [2] GUNERIUSSEN, T.; JOHNSEN, H.; SAND, K. DEM corrected ERS-1 SAR data for snow monitoring. International Journal of Remote Sensing, v.17, pg. 181–195, 1996.
- [3] FUNG, K. A.; TJUATJA, S.; BREDOW, J.W.: A scattering model for snow-covered sea ice. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, v.30, n.4, pg. 804 – 810, 1992.
- [4] FUNG, A. K.: Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Norwood, MA: Editora Artech House, 430p. 1994.
- [5] SHI, J., & DOZIER, J.: Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR, part II: Inferring snow depth and particle size. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v.38, n.6, pg. 2475–2488, 2000.
- [6] HALLIKAINEN, M.; ULABY, F.; ABDELRAZIK, M. Dielectric Properties of Snow in the 3– 37 GHz Range. IEEE Transaction Antennas and Propagation, v.34, n.11, pg. 1329–1340, 1986.
- [7] REES, W.G. Remote sensing of snow and ice. Boca Ratón, Flórida, EUA: Editora CRC Press, 1ª ed., 285p., 2006.
- [8] SADIKU, M. N. O. Numerical Techniques in Electromagnetics with MATLAB. Boca Ratón, Flórida, EUA: Editora CRC Press, 3ª ed., 648p., 2009.
- [9] Espinoza, J.M.A. MODELAGEM DO RETROESPALHAMENTO SAR E SUA REVERSÃO PARA ANÁLISE DO PACOTE DE NEVE SUPERFICIAL DA GELEIRA UNION, MONTANHAS ELLSWORTH – ANTÁRTICA. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, UFRGS, Porto Alegre, RS, 167 p., 2015.